

## مقایسه جاذب‌های سریم مولیبدات- پلی‌اکریلونیتریل و مس هگزاسیانوفرات II- پلی‌اکریلونیتریل در جداسازی سزیم اکتیو در محیط‌های آبی

رضا صابری\*؛ پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران،  
علی تخت‌ارشدیسیر؛ امور ایمنی هسته‌ای کشور، تهران

### چکیده

پروژه تحقیقاتی حاضر برای دستیابی به فناوری‌های نوین در زمینه رفع آلودگی‌های رادیواکتیو انجام شده است. امروزه ساخت و استفاده از رزین‌های مبادله‌کننده با بازدهی و کارایی زیاد، به‌عنوان روی‌کردی نوین در تحقیقات و همچنین روشی کاربردی در علوم جداسازی مطرح است. در این پروژه برای رفع آلودگی ماده رادیواکتیو  $Cs^{137}$  به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پاره‌های شکافت هسته‌ای، دو نوع کامپوزیت جدید با عنوان سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل<sup>۱</sup> و مس‌هگزاسیانوفرات II- پلی‌اکریلونیتریل<sup>۲</sup> تهیه شد و کارایی آن‌ها در شرایط پیوسته و ناپیوسته سنجیده شد. برای شناسایی ساختار ترکیب سنتز شده، از تکنیک طیف‌سنجی مادون قرمز استفاده شد. مساحت سطح دانه‌های جاذب و میزان تخلخل آن‌ها اندازه‌گیری شد. در راستای افزایش راندمان این دو کامپوزیت، ترکیب آن‌ها با ماده PAN تهیه شد و پایداری آن‌ها در شرایط مختلف محیطی سنجیده شدند. نتایج نشان می‌دهد که کامپوزیت مس‌هگزاسیانوفرات II- پلی‌اکریلونیتریل در شرایط یکسان راندمان بیشتری نسبت به کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل دارد.

### مقدمه

اخیراً تحقیقاتی زیادی در زمینه جداسازی سزیم از محیط‌های آبی با استفاده از مبادله‌گرهای یونی معدنی و آلی انجام شده است [۱]، [۲]، [۳]، [۴]. بر طبق تحقیقات صورت گرفته، استفاده از مبادله‌گرهای یونی آلی، مزایایی نظیر پایداری حرارتی زیاد، پایداری در محیط‌های اسیدی و بازی و همچنین سازگاری مناسب با شکل نهایی پسماند دارند. اخیراً مبادله‌گرهای یونی کامپوزیتی، برای جذب برخی از یون‌های فلزی خاص استفاده می‌شود که باعث افزایش مقاومت مکانیکی و شیمیایی و همچنین میزان حلالیت کمتر در جریان‌های آبی و روند بهتر تبادل نسبت به مبدل‌های معدنی خالص می‌گردد [۵].

در این تحقیق دو نوع کامپوزیت جدید برای افزایش راندمان جذب  $Cs^{137}$  در جریان‌های آبی تهیه و سنتز شد.

واژه‌های کلیدی: جداسازی، کامپوزیت،  $Cs^{137}$ ، H.C.F.C-PAN، تبادل یونی، CER.M-PAN

دریافت ۹۳/۲/۶ پذیرش ۹۳/۹/۱۶

\*نویسنده مسئول Rsaberi@aeoi.org.ir

۱. CER.M-PAN

۲. H.C.F.C-PAN

سپس، ماده مبادله‌کننده یون سزیم با ماده‌ای پیونددهنده آلی ترکیب شده و ذراتی با سایز بزرگتر و استحکام مکانیکی بیش‌تر تهیه شد. انتخاب ماده پیوند دهنده مناسب بسیار با اهمیت است زیرا این ماده باید پایداری شیمیایی زیادی داشته و نیروی نگهدارندگی و متراکم‌کنندگی کافی داشته باشد و در محلول‌های آبی، نسبت به یون  $Cs^{137}$  دارای نفوذپذیری زیاد و فاقد خواص تبادل یونی باشد [۶]، [۷]. با استفاده از طیف مادون قرمز، مشخصات کامپوزیت سنتز شده، ارزیابی شد و نحوه جذب یون سزیم با ایزوترم‌های جذبی بر اساس روابط لانگمور و فروندلیچ بررسی شد. در ادامه جریان آبی حاوی یون سزیم اکتیو از ستون‌هایی حاوی کامپوزیت تهیه شده، عبور داده شد و عوامل مختلفی در آن‌ها بررسی شد. میزان جذب سزیم در فرآیند ناپیوسته و فرآیند با بستر ثابت بررسی و میزان جذب دینامیکی و راندمان ستون کامپوزیتی مشخص شد.

## شرح آزمایش

### ۱. مواد شیمیایی و دستگاه‌های استفاده شده

مواد شیمیایی استفاده شده از تولیدات کارخانه مرک<sup>۱</sup> شامل آمونیوم سریم نیترات<sup>۲</sup>، آمونیوم هپتامولیبدات<sup>۳</sup>، سریم‌مولیبدات، دی‌متیل‌سولفوکسید<sup>۴</sup>، پلی‌اکریلونیتریل<sup>۵</sup>، تولید شرکت آلدریچ<sup>۶</sup>، سورفکتانت<sup>۷</sup>، مس (II) نیترات<sup>۸</sup>، و سایر موارد (با درجه خلوص تجزیه‌ای) هستند. دستگاه‌هایی نظیر طیف‌سنج جذب اتمی (پرکین‌المر<sup>۹</sup> ۸۴۳)، طیف‌سنج مادون قرمز (بروکر-وکتور<sup>۱۰</sup> ۲۲۰۱)، هم‌زن ترموستاتیک (اینفورز آبی-آکواتورن<sup>۱۱</sup>) و دستگاه BET (فیلیپس آس‌آپی<sup>۱۲</sup> ۲۰۱۰) نیز در این تحقیق استفاده شدند.

### ۲. تهیه کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل

در ابتدا برای تهیه جاذب سریم‌مولیبدات<sup>۳</sup>، ۲۵۰ cc از محلول آمونیوم سریم‌نیترات با غلظت ۰/۵ مولار و ۲۵۰ cc از محلول آمونیوم هپتامولیبدات با غلظت ۱ مولار را در بالن ۳ دهانه قرار داده و به‌طور متناوب در دمای ۵۰°C و به‌مدت ۴ ساعت هم زده شد. سپس محلول صاف و رسوب حاصل پس از شستشو با آب مقطر در دمای اتاق خشک شده و دانه‌بندی با مش مورد نظر (۲۲۴-۴۰۰) تهیه شد. سپس برای تهیه کامپوزیت مذکور ۵ گرم پودر سریم‌مولیبدات و ۱۰ cc محلول DMSO در داخل بالن ۳ دهانه و در دمای ۵۰°C و به‌مدت ۳ ساعت هم زده شد. ۴ گرم PAN با ۴۰ cc محلول DMSO و چند قطره Tween مخلوط شده و به‌مدت ۴ ساعت هم زده شد و سپس به محلول بالن ۳ دهانه اضافه شد [۸]. محلول حاصل در دمای ۵۰°C و به‌مدت ۴ ساعت هم زده و کامپوزیت شکل گرفت.

۱. Merck	۲. $(NH_4)_2.Ce(NO_3)_6$	۳. $(NH_4)_6MO_7O_{24}.4H_2O$	۴. DMSO- $C_2H_6SO$
۵. PAN- $[CH_2-CH(CN)]_n-$	۶. Aldrich	۷. Tween-80- $C_{64}H_{124}O_{27}$	۸. $Cu(NO_3)_2.3H_2O$
۹. Perkin Elmer	۱۰. Brucker-Vector	۱۱. Infors AG-Aquatron	۱۲. Philips-ASAP
۱۳. CER.M			

### ۳. تهیه کامپوزیت مس هگزاسیانوفرات II- پلی‌اکریلونیتریل

در ابتدا جاذب H.C.F.C با ترکیب  $\text{Cu}_2\text{Fe}(\text{CN})_6$  از طریق مخلوط کردن تدریجی محلول ۰/۲۵ مولار مس هگزاسیانوفرات (II) و محلول ۰/۷۵ مولار مس (II) نیترات با نسبت حجمی ۱:۱ در دمای  $50^\circ\text{C}$  تهیه شد. رسوب قهوه‌ای رنگ حاصل پس از دو روز باقی‌ماندن در محلول مادر، صاف و با آب دوبار تقطیر شده، شستشو داده شد و در داخل آون با دمای  $70^\circ\text{C}$  خشک شد. رسوب تهیه شده را با آسیاب به پودر تبدیل کرده و پس از عبور از الک‌های استاندارد به دانه‌بندی با مش  $(224-400)\mu\text{m}$  رسانده و نهایتاً آماده برای تبدیل به کامپوزیت شد. برای تهیه کامپوزیت مذکور از رسوب جاذب، باید ابتدا در بالن یک لیتری سه دهانه مجهز به سیستم همزن، ۵ گرم پودر هگزاسیانوفرات مس را در ۲۰ cc دی‌متیل‌سولفوکسید (DMSO) حلال پلی‌اکریلونیتریل، در دمای  $50^\circ\text{C}$  به مدت دو ساعت به‌طور یکنواخت هم زد. سپس ۵ گرم پودر PAN (با نسبت وزنی ۱:۱ با هگزاسیانوفرات مس) در ظرفی جداگانه با ۵۵ cc از محلول DMSO مخلوط کرده و به‌منظور سرعت بخشیدن به انحلال پلیمر، به این مخلوط چند قطره (سورفکتانت<sup>۱</sup>) اضافه شد. مخلوط به مدت ۳ ساعت و در دمای  $50^\circ\text{C}$  هم زده شد تا کاملاً یکنواخت و شفاف شود. نهایتاً این مخلوط همگن PAN را وارد بالن ۳ دهانه کرده و به مدت ۳ ساعت در دمای  $50^\circ\text{C}$  با مخلوط جاذب و DMSO هم زده شد.

## بحث و نتیجه‌گیری

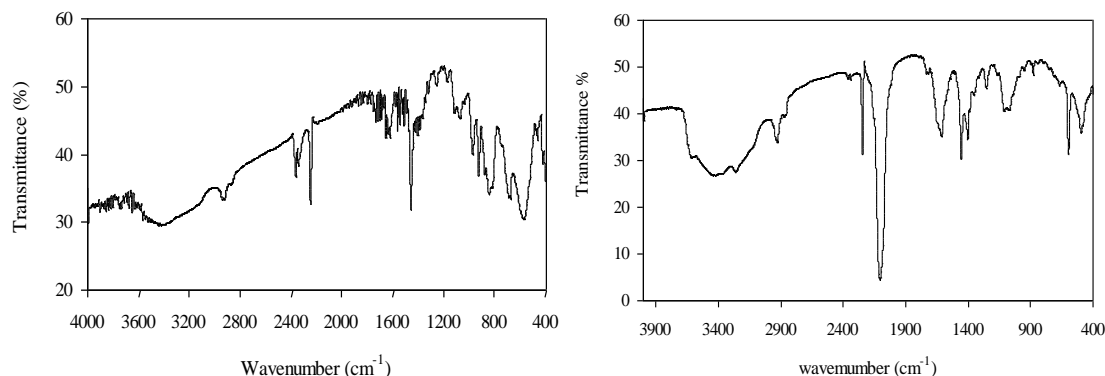
### ۱. طیف مادون قرمز در کامپوزیت‌های سنتز شده

پیک پهن جذبی در ناحیه  $3000-3650\text{cm}^{-1}$  در کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل و  $3650\text{cm}^{-1}$  در کامپوزیت مس هگزاسیانوفرات II- پلی‌اکریلونیتریل مربوط به ارتعاش کششی مولکول‌های آب درون شبکه‌ای است. همچنین پیک ناحیه  $1620\text{cm}^{-1}$  هر دو کامپوزیت ناشی از ارتعاش خمشی مولکول‌های آب موجود در ترکیب آن‌ها است. پیک مشاهده شده در ناحیه  $1100\text{cm}^{-1}$  کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل ناشی از ارتعاش خمشی پیوند Ce-O-H است، در حالی‌که پیک ناحیه  $2250\text{cm}^{-1}$  کامپوزیت مس هگزاسیانوفرات II- پلی‌اکریلونیتریل نشان‌گر حضور گروه سیانید در ساختمان آن است.

در کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل پیک ناحیه  $1465\text{cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاشات خمشی  $-\text{CH}_2-$ ، ناحیه  $1080-1100\text{cm}^{-1}$  به علت وجود ارتعاش کششی در پیوند C-O، ناحیه  $895-936\text{cm}^{-1}$  به دلیل حضور یون مولیبدات، پیک‌های ناحیه  $400-800\text{cm}^{-1}$  به دلیل حضور یون  $\text{Ce}(\text{OH})_2^{+2}$  و در ناحیه  $2250\text{cm}^{-1}$  به دلیل حضور گروه نیتریل در ترکیب سنتز شده هستند.

۱. Tween-80

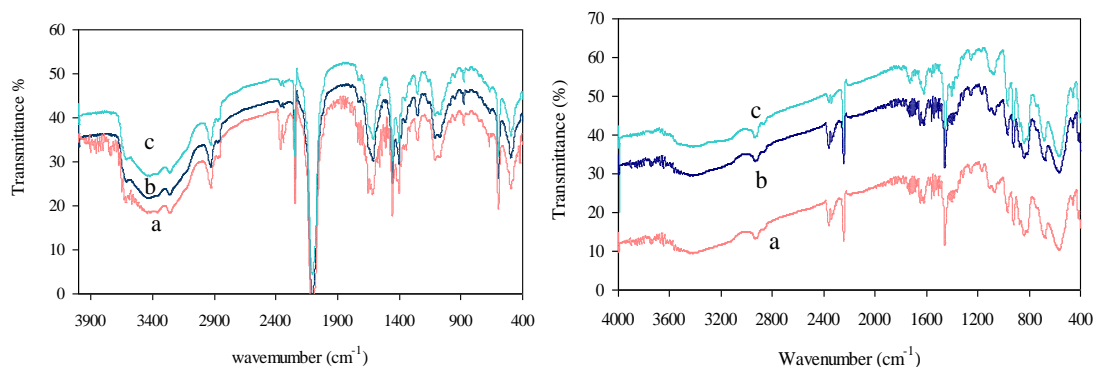
در کامپوزیت مس هگزاسیانوفرات II- پلی‌اکریلونیتریل بیک نواحی  $450-600\text{ cm}^{-1}$  به دلیل وجود پیوند کربن- فلز، ناحیه  $1100\text{ cm}^{-1}$  ناشی از ارتعاش کششی C-O، ناحیه  $3000\text{ cm}^{-1}$  ناشی از ارتعاش کششی CH- و ناحیه  $1465\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش خمشی گروه  $\text{CH}_2$ - است [۹].



شکل ۱. طیف IR (سمت راست) برای کامپوزیت سریم مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل و (سمت چپ) برای کامپوزیت مس هگزاسیانوفرات II- پلی‌اکریلونیتریل

## ۲. پایداری در برابر تابش گاما

کامپوزیت‌های سنتز شده تحت تابش‌های  $100\text{ KGy}$  و  $200\text{ KGy}$  قرار گرفتند. هدف سنجش عمل‌کرد گرانول‌های کامپوزیت با شرایط واقعی است. در ادامه نمونه‌های موجود با IR آنالیز شد و هر سه نمودار را یکجا رسم کرده تا تغییرات بیک‌های طیف IR دقیقاً بررسی شود. با توجه به شکل ۲ می‌توان نتیجه گرفت که هر دو کامپوزیت در برابر تابش‌های شدید مانند تابش  $200\text{ KGy}$  مقاوم است و هیچ‌گونه تغییر محسوسی در طیف IR به دست آمده از کامپوزیت‌های سنتز شده، ایجاد نشده است.



شکل ۲. مقایسه طیف‌های IR برای سه نوع کامپوزیت (A) تابش ندیده (B) تابش  $100\text{ KGy}$  (C) تابش  $200\text{ KGy}$  برای (سمت راست) کامپوزیت سریم مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل و (سمت چپ) کامپوزیت مس هگزاسیانوفرات II- پلی‌اکریلونیتریل

## ۳. اندازه‌گیری سطح مخصوص کامپوزیت‌ها

بر اساس آزمایش BET میزان سطح مخصوص کامپوزیت‌های مذکور در جدول ۱ ذکر شده است:

جدول ۱. سطح مخصوص کامپوزیت‌های سنتز شده

نام جاذب	سطح مخصوص
CER.M-PAN	$A^*(BET) = ۲۵/۱۸ \text{ m}^2/\text{g}$
H.C.F.C-PAN	$A^*(BET) = ۷۳/۵۸ \text{ m}^2/\text{g}$

بر اساس نتایج حاصل مشاهده می‌شود که اختلاف فاحشی در سطح جذب مخصوص این دو کامپوزیت وجود دارد.

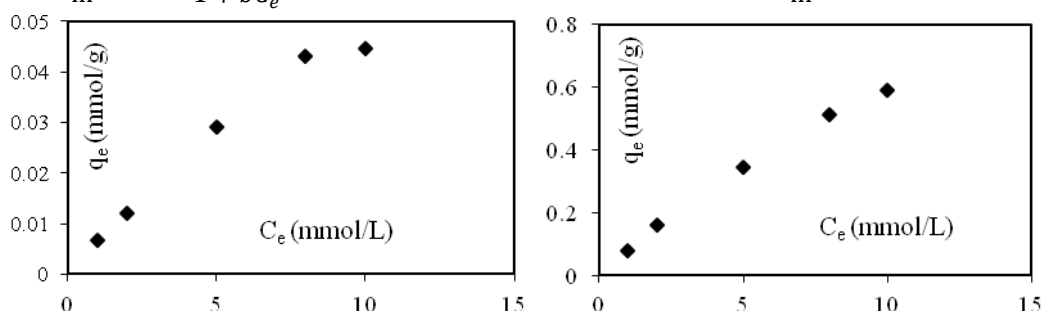
#### ۴. ایزوترم‌های جذبی

روابط زیر به ترتیب بیان‌گر روابط لانگمور و فروندلیچ بر اساس فرآیند جذب با استفاده از کربن فعال است

$$: [۱۰], [۱۱]$$

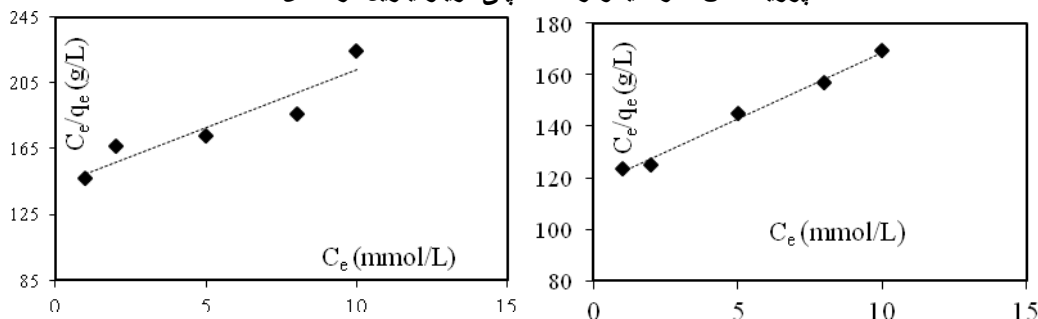
$$\frac{x}{m} = q_e = \frac{q_{max} b C_e}{1 + b C_e} \text{ لانگمور}$$

$$\frac{x}{m} = q_e = K C_e^{1/n} \text{ فروندلیچ}$$



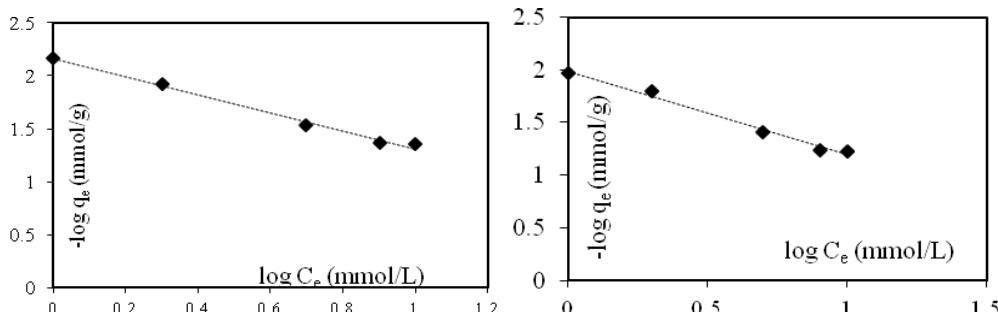
شکل ۳. نمودار ایزوترم جذبی یون  $Cs^+$  روی (سمت راست) کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل و (سمت چپ)

#### کامپوزیت مس هگزاسیانوفرات II- پلی‌اکریلونیتریل در دمای ۲۹۸K



شکل ۴. نمودار ایزوترم جذبی یون  $Cs^+$  روی (سمت راست) کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل

و (سمت چپ) کامپوزیت مس هگزاسیانوفرات II- پلی‌اکریلونیتریل بر اساس معادلات لانگمور در دمای ۲۹۸K



شکل ۵. نمودار ایزوترم جذبی یون  $Cs^+$  روی (سمت راست) کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل

و (سمت چپ) کامپوزیت مس هگزاسیانوفرات II- پلی‌اکریلونیتریل بر اساس معادلات فروندلیچ در دمای ۲۹۸K

در شکل ۳ نمودار ایزوترم جذبی برای کامپوزیت‌ها رسم شده است. شکل‌های ۴ و ۵، این نمودارها را بر اساس روابط و پارامترهای لانگمور و فروندلیچ نشان می‌دهد تا مشخص شود که این جاذب‌ها از کدام رابطه تبعیت می‌کند. جدول ۲ پارامترهای معادلات ایزوترم جذبی لانگمور و فروندلیچ برای کامپوزیت‌ها نشان می‌دهد [۱۲]، [۱۳]:

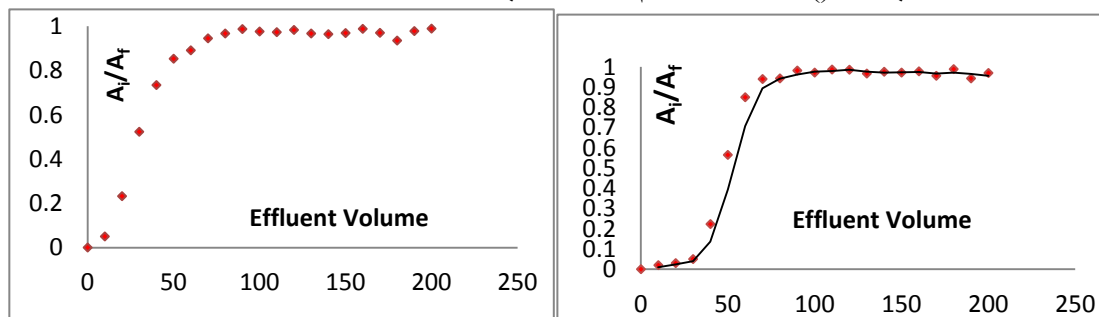
جدول ۲. پارامترهای معادلات لانگمور و فروندلیچ در ایزوترم جذبی یون  $\text{Cs}^+$  در کامپوزیت‌ها در دمای  $298 \text{ K}$

		CER.M-PAN	H.C.F.C-PAN
Langmuir constants	$q_{max}$ (mmol/g)	۰/۰۳۰	۰/۱۹۲
	$b$ (L/mmol)	۰/۰۵۳	۰/۰۴۴
	$R^2$	۰/۹۴۲	۰/۹۹۱
Freundlich constants	$K$ (mmol/g)	۰/۰۰۷	۰/۰۱۰
	$1/n$	۰/۸۵۴	۰/۷۹۴
	$R^2$	۰/۹۹۳	۰/۹۸۸

با توجه به مقادیر جدول مذکور مشخص شد که جاذب کامپوزیتی سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل از معادلات فروندلیچ تبعیت کرده و جذب در این نوع کامپوزیت، به‌صورت چند لایه‌ای است. همچنین جاذب کامپوزیتی مس‌هگزاسیانوفرات II- پلی‌اکریلونیتریل از معادلات لانگمور تبعیت کرده و جذب در این نوع کامپوزیت سنتز شده، به‌صورت تک لایه‌ای است [۱۴]، [۱۵].

### آزمایش محیط پیوسته

در این مرحله مقدار ۰/۲ گرم از هر دو کامپوزیت، وارد ستون‌های شیشه‌ای به قطر ۰/۸CM و طول ۶۰CM گردید. سپس ۲۰۰CC از محلول حاوی کاتیون  $\text{Cs}^+$  همراه با ردیاب (با غلظت ۵۰PPM) از ستون عبور داده شد. اکتیویته آزمایشگاهی ردیاب مورد نظر ۹۰۰MCI بود. دبی جریان خروجی با پمپ‌های پرستالیتیک در حدود ۰/۶۶ میلی‌لیتر بر دقیقه تنظیم شد. محلول خروجی از ستون در حجم‌های ۱۰ میلی‌لیتری در ظروف پلی‌اتیلنی جمع‌آوری شده و میزان  $\text{Cs}^{137}$  موجود با دستگاه گاما اسپکترومتری اندازه‌گیری شد. نهایتاً با رسم نسبت  $A_i/A_f$  (اکتیویته ورودی به اکتیویته نهایی) بر حسب حجم مایع خروجی، منحنی‌های جذبی در روش پیوسته تهیه شد [۱۶]. شکل ۷ نمودار جریان پیوسته (۱) جذب یون سزیم بر روی کامپوزیت‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۷. نمودار جریان پیوسته (۱) برای جذب یون  $\text{Cs}^+$  روی (سمت راست) کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل و (سمت چپ) کامپوزیت مس‌هگزاسیانوفرات II- پلی‌اکریلونیتریل

۱. Breakthrough

در انتها با استفاده از نرم‌افزار متلب برنامه‌ای تهیه شد که میزان ظرفیت جذب روی جاذب سنتز شده را در شرایطی که فقط ۰/۰۵ درصد جاذب اشباع شده باشد (شرایط عملی) و یا به‌صورت کامل و ۱۰۰ درصد، محاسبه کند [۱۷]، [۱۸]. حجم جاذب وارد شده در داخل ستون  $2/5 \text{ cm}^3$  است از این رو، دبی جریان عبوری  $15 \text{ BV/hr}$  است. در جدول ۳ میزان ظرفیت جذب برای هر دو کامپوزیت سنتز شده در شرایط ۵ درصدی و ۱۰۰ درصدی و همچنین راندمان ستون جاذب، ارائه شده است.

جدول ۳. میزان ظرفیت جذب در آزمایش ستونی برای جاذب‌ها

Flowrate, BV/hr		Dynamic capacity at 5% breakthrough (Practical)		Dynamic capacity at 100% breakthrough (Total)		Efficiency of adsorbent column (%)	
CER.M-PAN	H.C.F.C-PAN	CER.M-PAN	H.C.F.C-PAN	CER.M-PAN	H.C.F.C-PAN	CER.M-PAN	H.C.F.C-PAN
۱۵	۱۵	۲/۴۳ mg Cs/g	۷/۳۱ mg Cs/g	۸/۵ mg Cs/g	۱۱/۴۶ mg Cs/g	۲۸/۶۷	۶۳/۷۸

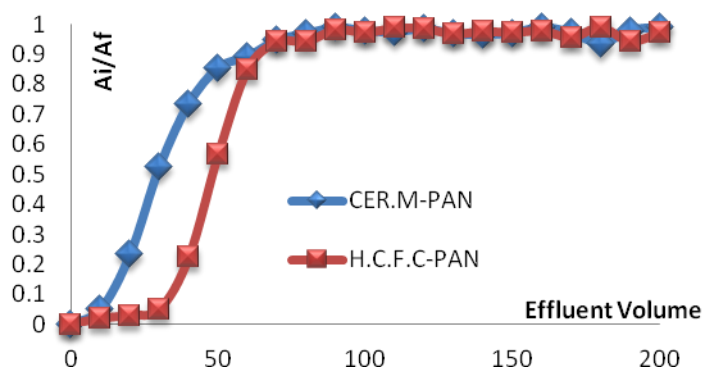
### مقایسه کامپوزیت‌ها

**کامپوزیت سریم مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل:** با فرمول مولکولی  $\text{Ce}(\text{OH})_2(\text{HMO}_4)_2\text{-PAN}$  ساختار کریستالی ندارد و به‌صورت آمورف است. سطح مخصوص گرانول‌های جاذب معادل  $25/18 \text{ m}^2/\text{g}$  است که نشان‌گر ساختار نامناسب این کامپوزیت برای تبادل یونی است. پارامترهای ترمودینامیکی گرماگیر بودن فرآیند را نشان می‌دهد. این کامپوزیت از رابطه فروندلیچ تبعیت کرده و ثابت رابطه فروندلیچ (K) آن برابر  $0/007$  و  $(1/n)$  برابر  $0/854$  و عدد رگراسیون  $R^2 = 0/993$  است. ظرفیت جذب کل پویا<sup>۱</sup> برابر با  $8/50 \text{ mg Cs/g}$  و ظرفیت جذب عملی پویا<sup>۲</sup> برابر با  $2/431 \text{ mg Cs/g}$  (حجم بستر  $2/5 \text{ cm}^3$  و دبی جریان  $15 \text{ BV/h}$ ) و راندمان ستون برابر  $28/67$  درصد شد.

**کامپوزیت مس هگزاسیانوفرات II- پلی‌اکریلونیتریل:** با فرمول مولکولی  $\text{Cu}_2\text{Fe}(\text{CN})_6\text{-PAN}$  ساختار کریستالی دارد. سطح مخصوص گرانول‌های جاذب معادل  $73/58 \text{ m}^2/\text{g}$  بوده که بیان‌گر ساختار مناسب این کامپوزیت برای تبادل یونی است. پارامترهای ترمودینامیکی گرماگیر بودن فرآیند را نشان می‌دهد. بیشینه ظرفیت جذب ( $q_{\text{max}}$ ) از رابطه لانگموور تبعیت کرده و برابر با  $0/192 \text{ mmol/g}$  و ثابت رابطه لانگموور (b) برابر با  $0/044$  و عدد رگراسیون  $R^2 = 0/991$  است. ظرفیت جذب کل پویا برابر با  $11/46 \text{ mg Cs/g}$  و ظرفیت جذب عملی پویا برابر با  $7/31 \text{ mg Cs/g}$  (حجم بستر  $2/5 \text{ cm}^3$  و دبی جریان  $15 \text{ BV/h}$ ) و راندمان ستون برابر  $63/78$  درصد شد.

۱. DC, Total

۲. DC, Practical



شکل ۷. مقایسه جذب ستونی هر دو کامپوزیت و نمایش اختلاف عملکرد در جذب ۵ درصد

با توجه به شکل ۷ و مقایسه راندمان جذب ستونی جاذب‌ها، مشخص شد که در شرایط محیطی برابر، کامپوزیت مس هگزاسیانوفرات II- پلی‌اکریلونیتریل میزان کاتیون  $Cs^+$  بیشتری را نسبت به کامپوزیت سریم‌مولیبدات- پلی‌اکریلونیتریل جذب می‌کند. این امر به دلیل خاصیت تخلخلی زیاد کامپوزیت مس هگزاسیانوفرات II- پلی‌اکریلونیتریل و همچنین آمورف بودن کامپوزیت سریم‌مولیبدات- پلی‌اکریلونیتریل است.

## منابع

1. A. Zhang, Q. Hu, "Adsorption of cesium and some typical coexistent elements onto a modified macroporous silica-based supramolecular recognition material", *Chemical Engineering Journal*, No.159 (2010) 58-66.
2. J. Vejsada, T. D. Hradil, Z. Øanda, E. Jelínek, K. Štulík, "Adsorption of cesium on Czech smectite-rich clays – a comparative study", *Applied Clay Science*, No. 30 (2005) 53-66.
3. J. Wu, B. Li, J. Liao, Y. Feng, D. Zhang, J. Zhao, W. Wen, Y. Yang, N. Liu, "Behavior and analysis of cesium adsorption on montmorillonite mineral", *Journal of Environmental Radioactivity*, No.100 (2009) 914-920.
4. Y. Park, Y. C. Lee, W. S. Shin, S. J. Choi, "Removal of cobalt, strontium and cesium from radioactive laundry wastewater by ammonium molybdophosphate-polyacrylonitrile (AMP-PAN)", *Chemical Engineering Journal*, No.162 (2010) 685-695.
5. A. K. Kaygun, S. Akyil, "Study of the behaviour of thorium adsorption on PAN/zeolite composite adsorbent", *Journal of Hazardous Materials*, No 147 (2007) 357-362.
6. S. Rengaraj, Y. Kim, C. K. Joo, K. Choi, J. Yi, "Batch adsorptive removal of copper ions in aqueous solutions by ion exchange resins: 1200H and IRN97H", *Korean Journal of Chemical Engineering*, No. 21 (2004).

7. Y. Omer, A.Yalcin, G. Fuat, "Removal of copper, nickel, cobalt and manganese from aqueous solution by kaolinite", Water Research, No. 37 (2003).
8. F. Šebesta, J. John, A. Motl, J. Watson, "Development of PAN-based absorbers for treating waste problems at U.S. DOE facilities", 5th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, ICEM (1995) 361-370.
9. A. Nilchi, B. Maalek, A. Khanchi, M. Ghanadi Maragheh, A. Bagheri, "Cerium(IV) molybdate cation exchanger: Synthesis, properties and ion separation capabilities", Radiation Physics and Chemistry, No.75 (2) (2006) 301-308.
10. N. Unlu, M. Ersoz, "Adsorption characteristics of heavy metal ions onto a low cost biopolymeric sorbent from aqueous solutions", Journal of Hazardous Materials, No. 136 (2006) 272-280.
11. E. Metwally, T. El-Zakla, R. R. Ayoub, "Thermodynamics study for the sorption of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$  radionuclides from aqueous solutions", Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences, Vol.9, No. 1 (2008) 1-6.
12. H. M. F. Freundlich, "Uber die adsorption in losungen", International Journal of Research in Physical Chemistry and Chemical Physics, Vol.57 (1906) 385-470.
13. S. M.Hasany, M. H. Chaudhary, "Adsorption behavior of microamounts of cesium on manganese dioxide", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 84/2 (1984) 247-256.
14. C. Namasivayam, M. V. Sureshkumar, "Removal of chromium (VI) from water and wastewater using surfactant modified coconut coir pith as a biosorbent", Bioresource Technology, No. 99 (2008) 2218-2225.
15. S. M. Hasany, M. H. Chaudhary, "Adsorption of cadmium from aqueous solutions on manganese dioxide", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, No.89 (1985) 353-363.
16. A. M. El-Kamash, "Evaluation of zeolite a for the sorptive removal of  $\text{Cs}^+$  and  $\text{Sr}^{2+}$  ions from aqueous using batch and fixed bed column operations", Journal of Hazardous Materials, No. 151 (2008) 432-445.

17. R. Saberi, A. Nilchi, S. RasoliGarmarodi, R. Zarghami, "Adsorption characteristic of  $^{137}\text{Cs}$  from aqueous solution using PAN-based sodium titanate silicate composite", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, No. 284 (2010) 461-469.
18. T. A. Todd, V. N. Romanovskiy, "A comparison of crystalline silicotitanate and ammonium molybdophosphate-polyacrylonitrile composite sorbent for the separation of cesium from acidic waste", Radiochemistry, Vol. 47 (4) (2005) 398-402.